

# A FELSŐLÉGGÖR SŰRŰSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA AZ ŰRKUTATÁS ESZKÖZEIVEL II.

Almár Iván  
MTA Csillagvizsgáló Intézet  
III Márton  
MTA Csillagvizsgáló Intézet  
Bajai Observatóriuma

## I. Megfigyelési módszerek és műszerek

A földi megfigyelőhálózat működése az összes űrkísérlet szerves része. A megfigyelés célja lehet 1) a felbocsátott égitestek folyamatos nyilvántartása; 2) a műszeres holdak térbeli helyzetének és orientációjának megállapítása a műszerek mérési eredményeinek értékelhetősége érdekében; 3) a földi mérőállomások helyének pontosabb meghatározása; 4) elsősorban a Föld gravitációs terére és a légkör sűrűségére, hőmérsékletére, szerkezetére vonatkozó tudományos információk szerzése.

A továbbiakban kizárólag az egyik legfontosabb célkitűzéssel, a mesterséges holdak mozgásának megfigyeléséből a légkörre levonható következtetésekkel foglalkozunk.

A követésre használt eszközök elektronikus vagy optikai berendezések, amelyek a hold irányát, távolságát, sebességét és esetleg fényességét mérik. Az *elektronikus követés* aktív rádióadóval rendelkező holdaknál történhet az interferenciaelven vagy Doppler-módszerrel, a lézertükörrel felszerelt holdaknál lézerrel, a többinél (néhány, a radarhullámok számára átlátszó műanyag-testet leszámítva) radar segítségével.

A mesterséges holdak fényének rögzítése történhet vizuális, fotografikus, esetleg fotoelektromos úton (*optikai követés*). A fényforrással nem rendelkező holdak optikai megfigyelése lehetséges, ha a megfigyelő égboltja sötét, de a látóhatár felett repülő holdat megvilágítja a Nap, esetleg egy lézerreflektor fénye. A két alaptípus fő előnyeinek és hátrányainak kvalitatív egybevetését nyújtja a következő táblázat:

	határmagnitúdó érzékenység	pontosság	kiértékelés	a berendezés súlya	költség	karbantart.	észlelést korlátozza
elektronika	nagy	közepes	gyors	nagy	nagy	nehéz	horizont
optika fot.	nagy v. közepes	nagy	lassú	közepes	nagy v. köz.		nappal, felhő, horizont
viz.		közepes	gyors	kis	kis	könnyű	Földárnyék

Az egyes eljárások kiegészítik egymást. Az elektronikus követés a kevés korlátozó tényező miatt nélkülözhetetlen a tudományos észleléseket végző holdaknál (2. feladat), de nyilvántartásukat is főképp radarral végzik (1). A lézer mérések kezdenek nagy szerephez jutni a kozmikus geodéziai

mérésekben (3). A felsőlégkör kutatásában jelenleg az optikai megfigyelések szerepe túlnyomó, ezért a továbbiakban csak az optikai műszerekkel foglalkozunk. Ugyanezek a megfigyelések fontosak a nyilvántartás és a gyakorlati geodéziai feladatok szempontjából is, a távcsövek alkalmazása ugyanis viszonylag egyszerű és olcsó lehetőséget kínál tömeges és ugyanakkor elegendő pontosságú iránymérések végrehajtására. Hasonlítsuk össze néhány tipikus elektronikus és optikai követőberendezés mérési pontosságát:

	Íránymeghatározás (ívperc)	Időmérés (0,001 s)
Radar	5	1
Minitrack, rádió	1 - 2	1
Baker-Nunn (foto)	0,06	2
Kinoteodolit	0,5 - 1	5
Vizuális TZK	1 - 3	10 - 100

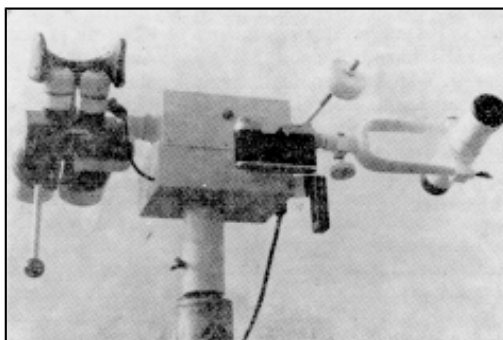
(Hozzátehetjük, hogy egyetlen Minitrack rádiómérés költsége meghaladja az ezer forintot, míg a vele egyenértékű vizuális méréseké nem több mint 5-10 Ft).

Az optikai követést általában csillagászok végzik (az asztrofotográfia klasszikus műszerei és módszerei azonban nem alkalmazhatók). Újszerű problémát jelent ugyanis a mesterséges holdak gyors mozgása. Korábban a 0,25 fok/perc sebességű napi mozgás volt a leggyorsabb, amivel a csillagászati fényképezésnél számolni kellett. A szputnyikok látszó szögsebessége viszont általában 10-90 fok/perc, és így a fény csak túlságosan rövid ideig esik a film vagy fotolemez egy meghatározott pontjára. A gyors mozgás erős követelményeket támaszt a fotokamera időszolgálatával szemben is, mivel 1'' elmozdulás mintegy 0,001 s-nak felel meg. Ugyanakkor a mesterséges holdak nagy száma, és az a körülmény, hogy az alacsonyan keringő holdak egyes pályaelemei gyorsan, előre nem jelezhető módon változnak, a halvány holdak tömeges megfigyelését követeli meg. A gyakorlat ezért különféle precíz (fotografikus) és "fél-precíz" (vizuális) követőtávcsövek kialakítására vezetett. (Sok csillagász idegenkedik a "primitív" vizuális mérésektől. Jelentőségük a felsőlégkör kutatásában azonban változatlanul nagy, mivel nagyobb számuk ellensúlyozza kisebb pontosságukat. Annak idején Kepler is Tycho Brahe durva észleléseit használta, és a Föld lapultságára levezetett első pontos adatok kiindulópontja sem a legprecízebb mérési anyag volt.)

Az optikai követőberendezések felosztása történhet a megfigyelés eszköze, vonatkoztatási rendszere és a műszer követési módja szerint. A távcső lehet fotografikus, vizuális vagy fotoelektromos; a vonatkoztatási rendszer a távcső felállításához vagy a csillagokhoz rögzített: végül a távcső álló, vagy a holdak látszó mozgását követő.

A vizuális mérések általában könnyen mozgatható, kis távcsövekkel (AT-1, Moonwatch, TZK, ballonteodolit, stb.) történnek. Az időpont regisztrálására kronográf vagy stopperóra szolgál. A hold látszó pozícióját vagy a környező csillagokéhoz viszonyítják, vagy a műszer fokbeosztásainak (rendszerint azimut és magassági szög) leolvasásával, lefényképezésével rögzítik. A magyar megfigyelőállomásokon fotoregisztációval ellátott, TZK típusú

binokulárokat használunk (D=80 mm, látómező 7° határmagnitúdó 9) (1. ábra). Teljesítőképességükre jellemző, hogy például 1968-ban három magyar állomás 1136 szputnyikátvonulásról 30 ezer pozíciót mért, ami már világviszonylatban is számottevő mennyiség. A mérések pontossága 0°,05-0°,1.



1. ábra. TZK binokulárból átalakított vizuális megfigyelő-távcső az 1114 számú miskolci állomáson. A fényképezőgép a körbeosztásokat regisztrálja az észlelés pillanatában

Pontosabb vizuális mérést tesz lehetővé a három párhuzamos távcsőből összeszerelt *kinoteodolit*, melynek két segédtávcsövénél egy-egy észlelő gondoskodik a hold folyamatos követéséről azimutban, illetve magasságban (közben rendszeres időközönként automatikusan regisztrálódik a távcső iránya), a főműszer pedig lefényképezi a szputnyikot a szálkeresztrel együtt. Gyakorlatban a lefényképezés csak a legfényesebb holdaknál lehetséges (nem látszik a szputnyik képe a felvételen), de az angol kinoteodolitok már eddig is hatalmas megfigyelési anyagot gyűjtöttek össze.

A *fotografikus* műszerek közül légsűrűségi vizsgálatokra eddig csaknem kizárólag a *Baker-Nunn kamerák* közelítő pontossággal kimért felvételanyagát használták. Az 500 mm tükörátmérőjű, super-Schmidt rendszerű távcsövek egyrészt nagy fényerejűek (f/1), másrészt a hold látszó mozgását is követni képesek, ezért még halvány szputnyikokról (határmagnitúdó 12) is kimérhető képet adnak, és a mérési pontosság mintegy 2 nagyságrenddel meghaladja a vizuálisat. A kamera 55 mm-es filmre dolgozik, a látómező 5°x30°. A szocialista országokban elterjedten használt NAFA, UFISzZ stb. típusú, kisméretű, álló kamerák pontossága megfelelő lenne, de felvételein csak a legfényesebb holdak képe látszik. Az első, sorozatban gyártott szovjet félautomata követő-kamera az AFU-75, amelynek egyik, a Szovjetunióból ajándékba kapott példánya 1969. szeptember óta az MTA Csillagvizsgáló Intézete Bajai Observatóriumának főműszere. A kamera jellemzői a következők:

D=210 mm	f=750 mm
Pozíciómérés pontossága	4"
Időrogzítés pontossága	0,001 s
Látómező	10x15 fok

32-34 dines filmet használva (19 cm széles) a határmagnitúdó a csillagra 10, átlagos sebességű szputnyikra 9.

A berendezés lényegében háromféle üzemmódban alkalmazható:

1. Aktív (felvillanásokat adó) holdak lefényképezésére;

2. Fényes (1-3 magnitúdójú) holdakra;
3. Halvány (3-9 magnitúdójú) holdakra.

A kamera valamennyi üzemmódban követi a csillagok mozgását. Aktív holdak fényképezésénél a kamera egyszerrűen nyitott zárral várja a felvillanásokat (1. üzemmód). Fényes holdak esetén egy forgó szektor szaggatottá teszi a szputnyik nyomát a filmen (2. üzemmód). A 3. üzemmódban észlelés előtt a hold látszó égi pályájának pólusa felé kell irányítani a távcső 4. tengelyét, hogy a film az ugyancsak előre beállított sebességgel egy főkör mentén közelítõleg követni tudja a hold mozgását (sikeres esetben a hold képe nem mozdul el a filmhez képest, tehát halványabb holdak is leképezõdnek). Az AFU-75 kamera automatikája ez esetben felváltva rövid ideig hol a szputnyik, hol a csillagok követésére állítja be a kamerát (maximálisan  $120^\circ$ -os pályaiív mentén), ily módon mind a mesterséges holdról, mind az összehasonlító csillagról pontszerű képet is ad. Az új, bajai műszer nyújtotta lehetőségeket szeretnénk a jövőben a légköri kutatások alapjául szolgáló megfigyelések pontosabbá tételére használni.

Röviden megemlítünk még néhány új, fotografikus berendezést, melynek felvételei a geodéziai alkalmazások mellett a jövőben a pontosabb légköri vizsgálatoknál is szerepet játszhatnak. A Zeiss Művek négytengelyű, programozott, automatizált műholdkövető kamerája Schmidt-rendszerű optikával rendelkezik ( $D=500/420$  mm,  $f=760$  mm). Precíz pozíciómérésekre kiváló az angol Hewitt-féle Schmidt-kamera ( $D=610$  mm,  $f=600$  mm), amely álló felállítású és nem filmre, hanem lemezre fényképez. Hasonló követőtávcső még a francia Antares és a Zvenyigorodban, (Moszkva mellett) felállított nagy fényerejű és gyújtótávolságú automatikus követőtávcső (VAU).

A fotoelektromos észlelési technika eddig viszonylag alárendelt szerepet játszott. A mesterséges holdak fényváltozásainak fotoelektromos regisztrálása eddig egyrészt a hold alakjának és orientációjának megállapítása, másrészt a légkör ózon és aeroszol tartamának analízise céljából történt, utóbbi a mesterséges holdak árnyékba lépésekor fellépő elsötétedés mértékéből számítható ki. Alkalmazható a fotoelektromos érzékelés pozíciómérésnél is, ha egy alkalmasan kialakított rés mögött elhelyezett fotocellával rögzítjük a hold áthaladásának pillanatát, de ez a módszer még csak kísérleti stádiumban van.

## **2. A megfigyelések feldolgozásának módszerei a periódusváltozás meghatározásáig**

### *A pályaelemekből kiinduló eljárások*

A megfigyelések feldolgozásának célja a pillanatnyi pályaelemek és azok deriváltjának meghatározása, hogy ezekből a korábban ismertetett\* elméleti megfontolások alapján a légkör változó sűrűség- és hőmérsékletprofilja kialakítható legyen. A pályaszámítás leggyakrabban alkalmazott, mondhatnánk *klasszikus* módszere a pálya valamilyen "dinamikus" modelljéből indul ki, és arra használja a megfigyeléseket, hogy a differenciális korrekciók módszerével javítsa a modell paramétereit. A modell lehet vagy a mozgást leíró differenciál egyenletek, vagy a mozgás alapparamétereinek időbeli változását leíró függvények rendszere. Az előbbi esetben a pályát a

\* Lásd a cikk első részét a Fizikai Szemle 1970/2. számában.

mozgás differenciál egyenleteinek numerikus integrálásával kapjuk, míg az utóbbiban a mozgásegyenletek analitikus integrálásával jutunk el a modellfüggvényekig. A megfigyelések "bevitelének" is két módja létezik. Bevihetjük egyszerre az összes észlelést, amely egy korlátozott időszakra vonatkozik, s úgy korrigáljuk a modell paramétereit, hogy e megfigyelések hibáinak négyzetösszege minimális legyen. A másik eljárás alkalmazása esetén kronologikus sorrendben, egyenként adjuk be a megfigyeléseket, és numerikus szűrési technikával becsüljük meg a rendszer változóit és egyéb mennyiségeket. Minden esetben ki kell számítani a megfigyeléseknek a modell-paraméterekre (vagyis a pályát definiáló mennyiségekre) vonatkozó parciális deriváltjait, vagy lépésről lépésre haladva numerikusan, vagy egy egyszerűsített modellt használva analitikusan.

Űrrakéták pályaszámításánál a numerikus integrációs módszert alkalmazzák. Ez ugyan sokkal több számítógépidőt igényel, mint az analitikus, de nincs szükség a teljes perturbációs elméletre, amely a bonyolultabb bolygóközi pályáknál nem is áll rendelkezésre. A mesterséges holdak pályaszámítására kidolgozott számítógépprogramok viszont általában a rövidebb, analitikus módszer valamelyik változatán alapulnak. Közepes hosszúságú pályákon, 1-8 napnyi időintervallumon belül megoszló megfigyelések feldolgozásánál a *differenciális korrekciók* eljárása a pályamodelt a szokásos 6 pályaelem segítségével definiálja, majd megadja, hogy a fix időponthoz (epochához) tartozó pályaelem-rendszerből kiindulva hogyan kapjuk meg a Föld-centrumú inerciális rendszerben a tetszőleges  $t$  időponthoz tartozó  $x, y, z$  térbeli pozíciót (esetleg az  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$  sebességet is). Ennél a lépésnél van szükség a perturbációs elméletekre. Legfontosabbak a zonális harmonikus okozta perturbációk, ezekre Kozai dolgozott ki elegáns elméletet [1], amely a Smithsonian Astrophysical Observatory DOI (Differential ORBIT Improvement) programjának alapját képezi. Ezenkívül alkalmazzák még különféle programokban Brouwer, Merson és Zsongolovics elméleteit is, melyekben a pályaelemek definíciója egymástól kissé eltérő. Ha nagyobb pontosságra törekszünk, a tesszerális harmonikusok hatását is figyelembe kell venni. Végül szerepelnek még a légellenállás okozta perturbációk, melyek elsősorban a középmozgásra (illetve keringési periódusra) hatnak, s ezért a középmozgás deriváltja beveendő a javítandó paraméterek listájára.

Léteznek azonban speciális programok, amelyek célja éppen a légsűrűség vizsgálata a légellenállás okozta hatás alapján. A légsűrűségnek az előre számítottól való eltérését határozta meg például *Barlier* francia csillagász eljárása [2]. A számítás első lépése a szokásos: a differenciális korrekciókkal meghatározza a  $t_0$  időpontra vonatkozó pályaelemrendszert ( $a_0, M_0$  stb.), majd Brouwer perturbációs elméletét használva jut el egy későbbi  $t_i$  időponthoz tartozó pályaelemekhez, köztük az  $M$  közepes anomáliához. Közben numerikus integrációval figyelembe veszi a légellenállás hatását is, felhasználva valamelyik légköri modellt a légsűrűség "normál" értékének levezetésére. Második lépésként ezekből a pályaelemekből kiszámítandó a hold iránya a  $t_i$  időpontban, és egybevetendő a megfigyelés eredményeként adódó tényleges iránnyal. Szukcesszív approximációval megkereshető, hogy a két irány szöge milyen  $M_i$  közepes anomáliára lesz minimális. Az  $M_i - M$  eltérés oka főképp az  $M_0$ , az  $a_0$  és a használt légköri modell hibája, vagyis

$$M_i - M = Ff + \frac{\partial M}{\partial a} \delta a_0 + \delta M_0$$

ahol  $F$  a légköri ellenállás változása,  $f$  pedig az a tényező, amellyel a légsűrűségnek a modell alapján számított "normál" értékei szorzandók. Az egyenletet valamennyi megfigyelésre külön-külön felírva, a 3 ismeretlen a legkisebb négyzetek módszerével határozható meg. Így a kapott  $f$  értékek közvetlenül felhasználhatók az alkalmazott légköri modellek javítására.

A módszeren alapuló számítógépprogrammal dolgozzák fel az ún. EUROBS-program keretében összegyűjtött megfigyelési anyagot a meudoni obszervatóriumban.

### *A pályaelemektől független eljárások*

A pályaelemek szukcesszív javításán alapuló valamennyi módszer közös előnye, hogy nem igényel speciális észleléseket, és bármilyen holdra alkalmazható. Eredményül valamennyi pályaelem változását megadja. Hátránya viszont, hogy a kiinduló pályaelemek megszerzése gyakran nehézségekbe ütközik, továbbá a felhasznált nagy elméleti apparátus miatt a program terjedelmes, rejtett hibái nehezen ismerhetők fel, és csak a leggyorsabb számítógépeken érdemes használni. A közepes hosszúságú pályáíven végzett megfigyelések feldolgozására készülő programok ezenkívül általában alkalmatlanok arra is, hogy egy-két napnál rövidebb karakterisztikus idejű változásokat mutassanak ki, mivel egy-egy pályaelemrendszer levezetéséhez hosszabb időszak összes megfigyelése szükséges, vagyis az időfelbontás nem túl jó.

Elsősorban a rendelkezésre álló, enyhén szólva szegényes számítógép-kapacitás tette szükségessé, hogy a szocialista akadémiák multilaterális együttműködése keretében dolgozó kutatók a vizuális megfigyelések feldolgozásának új, pályaelemek és nagy számítógépek nélkül is alkalmazható módszereit kidolgozzák. 1961-ben Ill a mesterséges holdak térbeli helyzetének meghatározását javasolta több állomás egyidejűleg végrehajtott (kváziszimultán) vizuális megfigyelés-sorozatából INTEROBS-program néven [3]. Az egyidejűség biztosítására szervezetet kellett létrehozni, melynek koordinálásával a Maszjevics professzor vezetésével működő bizottság a bajai állomást bízta meg. Az INTEROBS-hoz a szocialista országok 24 állomása és néhány nyugati megfigyelő is csatlakozott, a megfigyelési eredményeket tartalmazó magyar kiadvány évente 30-40 ezer észlelést tartalmaz.

Az INTEROBS módszer eredeti formájában több állomásról történő egyidejű bemérésből a hold térbeli helyzetének, majd a térbeli helyzetek sorozatából a momentán pálya összes elemeinek direkt levezetését célozta. A módszerre az MTA Csillagvizsgáló Intézetében számítógépprogram is készült, de bebizonyosodott, hogy valamennyi pályaelem egyidejű meghatározására a vizuális észlelések nem elég pontosak.

1965-ben egy budapesti konferencián *Lozinszkij* szovjet csillagász a légsűrűséggel összefüggő legfontosabb pályaelem, a keringési periódus egyszerű, közvetlen kiszámítására tett javaslatot. Valamely állomásról megfigyelve a hold két átvonulását a topocentrikus (látszó) égi egyenlítő főkörén, a hold drakonikus keringési idejétől csak kevéssé különböző periódust kapunk. Az égi egyenlítőn való áthaladás pillanata ugyanis egyúttal a

megfigyelő szélességi köre síkjának, vagyis egy az egyenlítővel párhuzamos síknak a metszési ideje is. Lozinszkij módszere, akárcsak az eredeti INTEROBS javasolta, speciális észlelések végrehajtását követeli meg, de előnye, hogy nem kívánja a pályaelemek előzetes ismeretét, egyszerű és mégis nagy időfelbontást tesz lehetővé.

Egészen másféle megfigyelések szükségesek a Grigorjevskij szovjet csillagász által kezdeményezett *SPIN* programhoz, amelynek célja azonban szintén a légsűrűség fluktuációinak vizsgálata. Ismeretes, hogy a mesterséges holdak tengelyforgása általában szabályos fényesség-ingadozást eredményez, amelynek periódusa - akárcsak a keringési idő - a légellenállás hatására csökken. Egyszerű, vizuális becslésekkel megállapítható a rotációs periódus és annak változása, így bizonyos holdak esetében ez az eljárás is alkalmazható a légsűrűségi vizsgálatokban. A fotometriai észlelések feldolgozása azonban nem egyszerű feladat.

### *Kombinált módszerek*

Sokat ígérően tökéletesedtek az említett "direkt" módszerek az elmúlt években. Zsongolovics [4] még 1965-ben javasolta az INTEROBS módszer céljának leszűkítését a kvázi-drakonikus keringési idő meghatározására. A hold térbeli pozícióit radiálisan a Föld felszínére vetítve ún. szubszatellita-pontok sorozatát kapjuk. Válasszunk ki egy szélességi kört és állapítsuk meg, hogy mikor haladnak át a szubszatellita-pontok ezen a "referencia szélességen". Közelítő pályaelemek ( $a, i, e, R_n$  - rádiuszvektor) segítségével minden egyes  $t_n, \phi_n$  pontból meghatározható a metszés ideje ( $t_0$ ):

$$t_0 = T_n - \frac{\dot{R}_n}{\kappa} (\mu_n - \mu_0)$$

$$\sin \mu_n = \frac{\sin \phi_n}{\sin i}, \quad \sin \mu_0 = \frac{\sin \phi_0}{\sin i}$$

$$\kappa = 190,2 \sqrt{a(1 - e^2)}$$

Azáltal, hogy a "metszésidőt" minden egyes pontból külön-külön kiszámíthatjuk, pontosabbá tesszük a számítást. Több vonulást ugyanarra a referencia-szélességre redukálva ismét egy "kvázi-drakonikus" periódust kapunk, amelynek változása arányos a légsűrűséggel. A változás akár közvetlenül a  $P(t)$  görbe differenciálásával, akár a változócsillagok fénygörbe-analízisének bevált  $O-C$  módszerrel közvetlenül a  $t_0$  időpontokból [5] nyerhető. Ugyanis egy-egy időszakra, melyen belül a fékeződés, és ennek következtében  $\dot{P}$  is állandó, a megfigyelt ( $O$ ) és a kezdőponthoz tartozó  $P_0$  periódussal lineárisan számolt ( $C$ ) időpontok különbsége kvadratikus függvény. Az átlagos periódusváltozás  $\dot{P}$  egy-egy ilyen időszakon belül előnyösen számolható, mint a  $2(O-C)$  ordinátájú,  $n(n+1)$  abszcisszájú diagramon kapott egyenes meredeksége ( $n$  - a keringések száma az időszak elejétől mérve).

Ugyanez a két eljárás eredménnyel alkalmazható Lozinszkij módszerének javítására is. A Zsongolovics-féle képletek kissé módosított alakjával a

különböző földrajzi szélességű állomásokról észlelt égi egyenlítő metszési idők is közös referencia-szélességre redukálhatók. Magának az egyenlítőmetszés időpontjának meghatározása is előnyösen történhet egy, a közelítő pályaelemekből levezetett fiktív látszó égi pálya segítségével. Másik, ugyancsak az interpolációs eljárás pontosságát növelő eljárás az egyes pontpárok közötti átlagos sebességet határozza meg, és ezúton számítja ki szintén valamennyi pontból kiindulva a keresett metszésidőt. Utóbbi módszer előnye, hogy alkalmazásához pályaelemek nem szükségesek.

1696-ben Illés és Horváth az MTA Csillagvizsgáló Intézetben elkészítette az ún. *PERLO* számológépprogramot periódusváltozás meghatározására, amely vizuális vagy fotografikus sorozatészlelések Lozinszkij módszerével történő feldolgozását végzi.

Míg az eddigi módszerekben a pályaelemek alkalmazása csak kiegészítés és a pontosság fokozására szolgál, addig III új javaslatának lényege néhány, viszonylag pontosan ismert pályaelemből a szubsatellita-pont meghatározása egyetlen irányméréssel. A pályasík helyzetét megadó koordinátákat ( $i, \Omega, \omega$ ) ismertnek véve ugyanis a szputnyik látszó irányának azimutja éppen a keresett pontot metszi ki a pályasíknak a földfelszínnel alkotott metszéspontjából. Ezzel az ún. *SUBSAT* módszerrel - amelynek előnye, hogy nem igényel speciális méréseket - a továbbiakban szintén a kvázidrakonikus periódus meghatározását végezzük számítógépprogram segítségével.

A tárgyalt "független", és a pályaelemektől "félíg független" módszerek nagy időfelbontásuk miatt különösen a gyors fluktuációk tanulmányozásában juthatnak jelentős szerephez. Széleskörű alkalmazásukra eddig még nem került sor, de a készülő programok ezt hamarosan lehetővé teszik. Mindez azonban nem változtat azon a tényen, hogy a felsőlégkör szerkezetét és a sűrűségváltozásokat okozó effektusok természetét a klasszikus eljárásokon alapuló pályaszámítási programokkal sikerült az elmúlt tíz év alatt nagy vonalakban tisztázni.

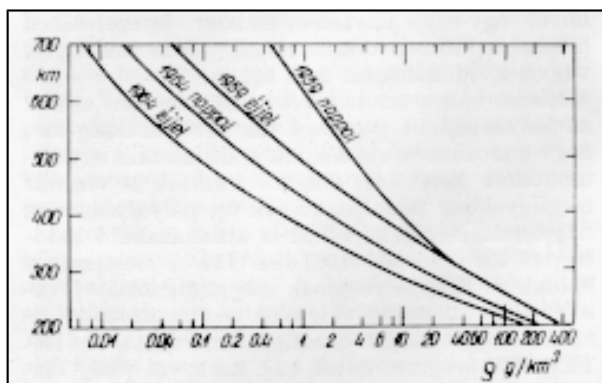
### **3. A felsőlégkör szerkezete és fluktuációi**

Ahogy a hatvanas évek elejére felszaporodtak a különféle pályákon mozgó mesterséges holdak fékeződésére vonatkozó megfigyelések, elsősorban King-Hele, Jacchia és Marov munkássága nyomán kialakult a felsőlégkör szerkezetére, és annak változásaira vonatkozó dinamikus elképzelés. Ez a körülmény új, szabvány légköri modellek rekonstruálását tette lehetővé, amelyek természetesen ráépülnek a sztratoszféráról és termoszféráról eddig szerzett közvetlen ismereteinkre.

Mai felfogásunk szerint a légkör összetétele mintegy 80 km magasságig állandó, 80-100 km között a keveredés még hatásos, de a közepes molekulásúly lényegesen csökken az atomi oxigén részarányának gyors növekedése következtében, végül 100 km magasságban a keveredés jelentősége megszűnik, és a légköri összetevők gravitációs szeparálódását tapasztaljuk. 120 km magasságban feltehetőleg diffúz egyensúly uralkodik. Ennél nagyobb magasságokban a kémiai összetétel már nem a magasság, hanem a pillanatnyi légköri hőmérséklet függvénye: 300-1000 km-en magasabb exoszferikus hőmérséklet idején (vagyis amikor a Nap sugárzása erőteljesen melegíti az exoszférát) az atomi oxigén dominál, míg lehűléskor 500 km fölött a hélium, 800 km körül a hidrogén válik fontos alkotóelemmé.

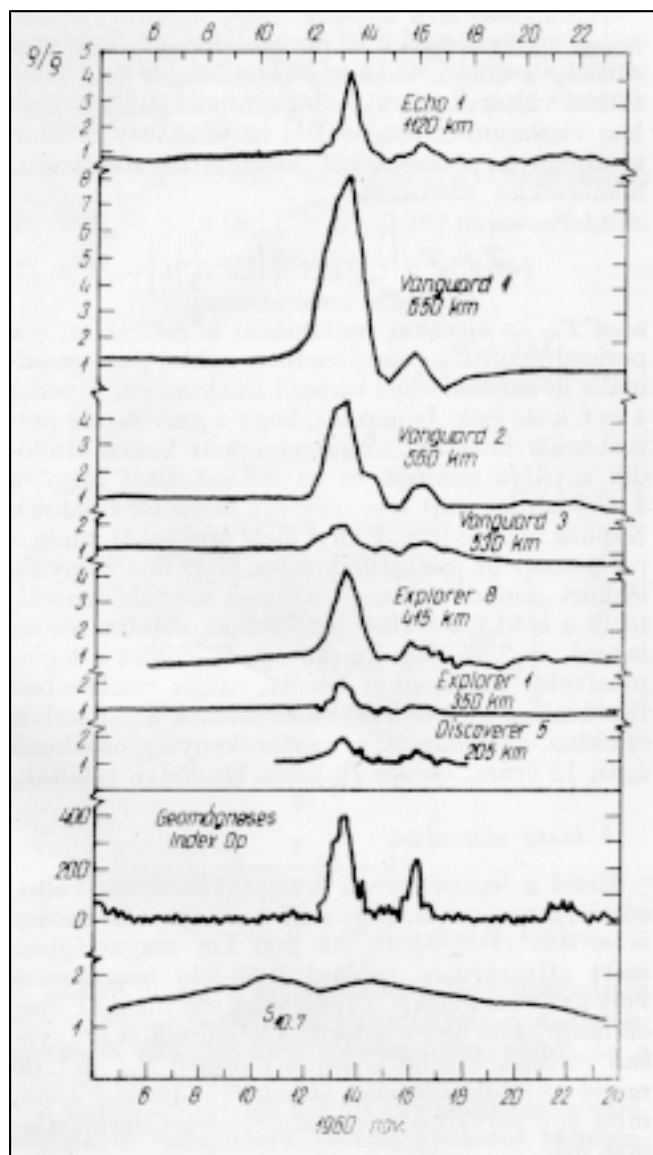


A *hőmérséklet*, mint ismeretes, a sztratoszférikus minimumtól felfelé, kb. 50 km magasságig emelkedik (270 °K), majd átmeneti csökkenés után, amely 85 km-en 180°K-t eredményez, rohamosan nő 100 km és 200-300 km között. Ez a növekedés azonban már erősen függ a pillanatnyi naptevékenységtől. 200 km fölött a melegedés lassabb, az alsó exoszférától kezdve pedig a hőmérséklet már alig függ a magasságtól, viszont erőteljesen változik a napszakkal és a naptevékenységgel. A mesterséges holdak fékeződéséből kapott eredmények szerint az exoszférában maximális a hőmérséklet nappal és erős napaktivitáskor, minimális éjjel és gyenge naptevékenység idején. A hőmérséklet jelentése 500 km fölött kérdésessé válik ugyan, azonban mint a közönséges gáztörvényben szereplő mennyiség továbbra is definiálható. A hőmérséklettel együtt a levegő sűrűsége és - mint említettük már - kémiai összetétele is fluktuál az exoszférában. Tulajdonképpen a sűrűségváltozás az, amit a mesterséges holdak fékeződéséből közvetlenül le lehet vezetni, ebből térnek át a légköri modellek felhasználásával az exoszféra hőmérsékletének és összetételének meghatározására (2. ábra).



2. ábra. A légsűrűség magasságprofilja éjjel és nappal, 1959-ben, vagyis a naptevékenység maximumakor, és 1964-ben minimum idején. A napszakos effektus maximuma 1964-ben 500 km-re, 1959-ben viszont 700 km fölé esett.

Az egymással bonyolult kölcsönhatásban fellépő különféle *sűrűségfluktuációk* csoportosítása a kiváltó ok szerint ma még nem végezhető el teljesen, ezért célszerűbb az effektus karakterisztikus időtartama alapján osztályozni.



3. ábra. A geomágneses effektus jól érzékelhető ezen a Jacchia által publikált eseten, amikor 7 különböző magasságban keringő hold fékeződésében észleltek az  $a_p$  geomágneses indexével párhuzamos változást. A 10,7 cm-es rádiófluxus intenzitása (alsó görbe) ugyanakkor közel állandó volt

### Egy hónapnál gyorsabb változások

Forrásuk a Nap, mely hatását a felsőlégkör fokozott melegítésével fejti ki, korpuzkuláris vagy extrém ultraibolya (EUV) sugárzásának megerősödése révén.

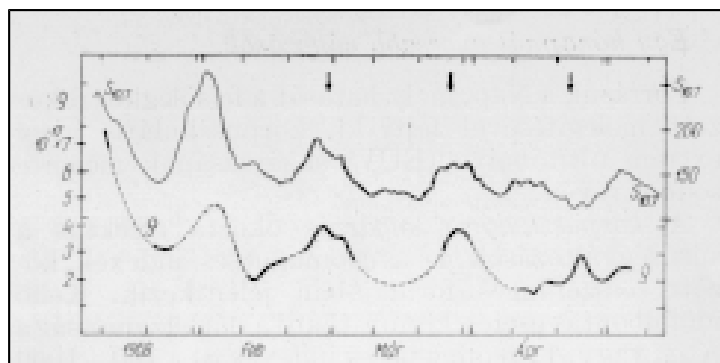
A korpuzkuláris sugárzás okozta effektus a sűrűségváltozások és a geomágneses indexek közötti összefüggés formájában jelentkezik. Kellő időfelbontás esetén kimutatható a párhuzamosság a  $K_p a_p$  vagy  $A_p$  geomágneses indexek és a 160-1000 km közötti sűrűségváltozás menetében (3. ábra). A légköri effektus amplitúdója nagyobb magasságban növekszik, de a He övet elérve újra csökken. A tapasztalt időkézés általában 6 óra, de a kérdés még nincs egyértelműen tisztázva. A sűrűségváltozást  $\Delta T$  hőmérséklet-változásra átszámolva erős mágneses viharok esetén  $a_p$ -vel, kis

geomágneses változások idején  $K_p$ -vel arányos hőmérséklet-növekedést kapunk, ez utóbbiaknál

$$\frac{\Delta T}{\Delta K_p} = 21^\circ$$

Bizonyosra vehető, hogy a geomágneses effektus végső soron a szoláris széllel függ össze. Az energiát Dessler szerint magnetohidrodinamikai hullámok szállítják át a magnetoszférán, miközben energiát veszítenek a termoszférában, teljes egészében felmelegítve azt.

A nap EUV sugárzásának ( $\lambda=100-1000\text{Å}$ ) felerősödve is növeli az exoszférikus hőmérsékletet. Mivel az EUV sugárzás folyamatos megfigyelése mesterséges holdakról még nem lehetséges, be kell érünk a Nap sugárzási spektruma olyan tartományainak földi megfigyelésével, amelyek közvetlenül nem hatnak a földi légkörre, de korrelálnak az EUV sugárzás intenzitásával. Tapasztalat szerint a deciméteres hullámhosszú rádiósugárzás, amely olyan koronakondenzációkban jön létre, ahol lágy röntgen és EUV sugárzás is keletkezik, alkalmas erre a szerepre. (Újabban rendelkezésre állnak a röntgensugárzás intenzitásváltozásai is, mesterséges holdakon elhelyezett műszerek megfigyelései alapján.) Legelterjedtebben az ottawai obszervatórium 10,7 cm-es rádióméréseit használják. A deciméteres fluxus intenzitása ( $S_{10,7}^*$ ) egy kb. 27 napos periódussal ingadozik, amely megegyezik a Nap aktív zónáinak átlagos rotációs periódusával. E jelenség oka az, hogy az aktivitási centrumok rendszerint a Nap felszínének egy-egy kisebb helyén koncentrálnak, ezért a naptevékenységi indexek változnak a Nap rotációs periódusával. A légsűrűség-változásokban ugyancsak könnyen kimutatható egy kb. 27 napos menet, mely általában egy-két napos késéssel követi a rádiófluxus intenzitás-változásait. A sűrűség  $\delta \sim S_{10,7}^m$ , ahol  $m$  értéke 2-3 körüli és 1000 km-ig növekszik a magassággal, továbbá függ a helyi időtől is. Noha az OSO holdak kvalitatíve igazolták az összefüggést az  $S_{10,7}$  és a legintenzívebb EUV spektrumvonalak erőssége között, újabban kimutatták, hogy a légsűrűség változásokban néha olyankor is jelentkezik a 27 napos menet, amikor a rádiósugárzásban nem, vagyis a 10,7 cm-es fluxus, mint index nem teljesen megbízható (4. ábra) [6].



4. ábra. Az Echo-1 amerikai léggömbhold fékeződéséből Lozinszkij módszerével levezetett és 800 km magasságra redukált  $\delta$  sűrűségadatok a napszakos és a geomágneses effektus figyelembevétele után 1968. januártól áprilisig párhuzamos menetet mutattak az  $S_{10,7}$  rádiófluxussal, de áprilisban, az  $S_{10,7}$ -tel ellentétben, folytatták a 27 napos ciklust. ([6] nyomán - a  $\rho$  görbe vastagabban kihúzott szakaszai mutatják a jól átészlelt időintervallumokat.)

## A közepes időtartamú változások

Két teljesen különböző effektus eredményez néhány hónapos, legfeljebb egy-két éves ingadozást a mesterséges holdak periódusváltozásában.

A *féléves effektus* a legérdekesebb és a legtöbbet vitatott felsőlégköri jelenség. Tapasztalat szerint a légsűrűség - valamennyi más effektus figyelembevételét követően - féléves periódusú sűrűségfluktuációt mutat, melynek maximuma április elején és október végén, minimuma január közepén és június végén jelentkezik. Az októberi maximum rendszerint magasabb, mint az áprilisi, a júliusi minimum pedig mélyebb, mint a januári. Az amplitúdó változik a magassággal, és évről évre kissé különböző. Tízéves megfigyelési anyagra támaszkodva King-hele az amplitúdó változásának 33 hónapos menetét mutatta ki, [7] és ezt a sztratoszférikus szelek közel kétéves ciklusával próbálta kapcsolatba hozni. Az egyenlítői zónában ugyanis a sztratoszférikus szelek nagyjából kétéves periódussal váltogatják irányukat. Szorosabb kapcsolat a két jelenség között rendkívül érdekes lenne, bár egyik eredetét sem sikerült eddig tisztázni. Annyi azonban Cook vizsgálata alapján [8] bizonyosnak látszik, hogy a féléves effektus még 90 km magasságban is kimutatható, és amplitúdója 30%. Újabban Ill és Barlier megvizsgálták a féléves effektus "finomszerkezetét" az áprilisi maximum közelében, és jellegzetes, évről évre visszatérő és különböző magasságokban egyaránt jelentkező mellékminimumokat találtak [9]. A féléves effektus eredete ismeretlen, de valószínűleg a légkör alsó rétegeiből származik.

Ellentétben valamennyi korábban tárgyalt jelenséggel, a *napszakos effektus* helyi jellegű, nem az atmoszféra egészének pulzációjából ered, hanem annak következménye, hogy a légkörben egy, a Nap felé irányuló "kidudorodás" vándorol. Az adott hely fölött 200 - 1000 km magasan a sűrűség 24 órás periódussal változik, reggel a napsugárzás hatására növekszik, helyi időben 14 órakor maximális, ezután egyenletesen csökken éjfélig, majd hajnalig tartó lapos minimum után újra növekedni kezd. Az effektus amplitúdója egyrészt függ a naptevékenységtől, másrészt a magassággal növekszik, mivel a légkör felmelegedéséből adódó relatív sűrűség-növekedés nagyobb, ha az alapsűrűség kisebb. (Viszont 700 km fölött a sűrűség-növekedést részben ellensúlyozza, hogy a közepes molekulatömegű levegő a melegedés hatására csökken.)

Noha ez az effektus a valóságban gyors, és a sűrűségváltozás adott hely fölött 24 óra alatt megy végbe, a mesterséges holdak mozgásában, pontosabban a periódusváltozás értékében mint egy lassú, több hónapos ciklusú ingadozás jelentkezik, ezért soroltuk a közepes időtartamú változások közé.

Tekintettel arra ugyanis, hogy a periódus-csökkenés szempontjából a perigeumpont körüli légsűrűség a döntő, valamely mesterséges hold fékeződése változik pályája perigeumpontjának a Naphoz viszonyított szögével, a helyi idővel is. Pontosabban a fékeződésből levezetett exoszférikus hőmérséklet változása

$$T = T_N \left[ 1 + 0,35 \cos \frac{\varphi}{2} \right]$$

ahol  $T_N$  az éjszakai (minimális) hőmérséklet,  $\varphi$  a perigeumpontba vezető rádiusz-vektor és a maximális hőmérséklethez tartozó irány szöge,  $n$  pedig 4 és 6 közé esik. Ismeretes, hogy a gravitációs perturbációk hatására a perigeumpont lassan eltolódik a pálya mentén, és az inklinációtól függően 2-60 hónap alatt tesz meg egy teljes fordulatot a Naphoz viszonyítva. Ennyi ideig tart tehát, amíg a perigeumpont végigvándorol a Nap felé irányuló légköri "kidudorodáson", s ennek megfelelően változik a Hold fékeződése is. Noha az effektus régóta ismert, és 300-800 km között, mégis részleteiben tisztázatlan még, és különböző szerzők a napszakos effektus maximumát a naptevékenység csökkenő ágán 12 órára, illetve 16 órára eltolódva találták.

### *A lassú változások*

Mivel a légkör követi a naptevékenység változásait, természetes, hogy a 11 éves *napciklus* hatása is erősen érvényesül. Az 500 km magasságban mért átlagsűrűség például 1958-ban hússzorosa volt az 1964. évinek. Tapasztalat szerint a 11 éves cikluson belül az exoszférikus hőmérséklet arányosan változik a több hónapra közepelt  $S_{10,7}$ -tel, de mivel az eddig átészlelt időintervallum alig több, mint egy periódus, a jelenség részletei tisztázatlanok még.

### *Légköri modellek*

A felsőlégkör első modelljei, melyek a már ismertett effektusok figyelembevételével készültek, abból a feltevésből indultak ki, hogy 100-120 km magasan bizonyos állandó határfeltételek érvényesek. A két legismertebb közül a CIRA (COSPAR International Reference Atmosphere) a már elavult Harris-Priester modellre épül és a diffúz egyensúly állapotát tételezi fel a termoszférában, és az alsó exoszférában. A CIRA-65 a napszakos effektust úgy veszi figyelembe, hogy a légköri paramétereket mint a magasság függvényeit helyi időben két órás intervallumonként adja meg. Ez nyilvánvalóan nem tükrözheti a légköri "kidudorodás" évszakos (deklinációbeli) vándorlását, s ezért inkább csak alacsony szélességekre érvényes. Jacchia viszont Nicolet modelljét tökéletesítette, amely a  $T_\infty$  exoszferikus hőmérsékletet tekinti független változónak. A hőmérsékletnek a magassággal való változásának leírására (különböző  $T_\infty$ -ek esetén) empirikus függvényeket használ. A  $T_\infty$  kiszámítása adott földrajzi helyre ( $\phi$ ) a pillanatnyilag uralkodó napfizikai és geofizikai paraméterekkel ( $S_{10,7}, a_p$ ), továbbá a Nap koordinátaival ( $\delta, H$ ) az évi fázissal ( $d$  = az év hányadik napja) és empirikus állandókkal ( $R, m, n, \beta, \rho, \chi$ ) történik a következő módon: [10].

$$T_0 = 418^\circ + 3^\circ,60\bar{S}_{10,7} \quad (11 \text{ éves ciklus})$$

$$T_1 = T_0 + 1^\circ,8(S_{10,7} - \bar{S}_{10,7}) \quad (27 \text{ napos effektus})$$

$$T_2 = T_1 + 1^\circ,0a_p + 125^\circ(1 - e^{-0,08a_p}) \quad (\text{geomágneses effektus})$$

$$T_3 = T_2 + \left[ 0,37 + 0,14 \sin 2\pi \frac{d - 151}{365} \right] \cdot \bar{S}_{10,7} \sin 4\pi \frac{d - 59}{365} \quad (\text{féléves effektus})$$

$$T_{\infty} = T_3(1 + R \sin^m \theta) \left[ 1 + R \frac{\cos^m \eta - \sin^m \theta}{1 + R \sin^m \theta} \cos^n \frac{\tau}{2} \right] \quad (\text{napszakos effektus})$$

ahol

$$\eta = \frac{1}{2}(\phi - \delta)$$

$$\theta = \frac{1}{2}(\phi + \delta)$$

$$\tau = H + \beta + \rho \sin(H + \chi)$$

A modell magán a hőmérsékleten kívül megadja a sűrűséget, az összetevők részarányait, a skálamagasságot stb. Némileg tökéletesített változata a Jacchia-69 modell.

Valamennyi modell túlzott egyszerűsítése a valóságnak, és finomításra, esetleg gyökeres változtatásra szorul (nem tartalmazzák például a modellek a féléves effektus "finom szerkezetét"). A kutatás fő eszköze változatlanul a megfigyeléseken alapuló pályaelemzés, mivel a mesterséges holdakról közvetlenül végrehajtott, "in situ" mérés ritkasága, kalibrációs problémái és térbeli korlátai miatt másra, mint a kapott eredmények kiegészítésére és ellenőrzésére nem alkalmas. Ugyanakkor a legkülönbözőbb célú, alakú és pályájú mesterséges holdak ezrei keringenek ideális próbatestekként a felsőlégkörben, és mindenkinek rendelkezésére állnak, aki megfigyelésükkel foglalkozni kíván. Az MTA Csillagvizsgáló Intézete szputnyikmegfigyelési csoportjának kutatói a nemzetközi együttműködés nyújtotta kedvező lehetőségeket kihasználva, az ismertett műszerekkel és módszerekkel a légköri modellek tökéletesítésén, végső soron a Nap földi hatásainak jobb megismerése érdekében dolgoznak az első szputnyik felbocsátása óta.

## IRODALOM

- [1] Y. Kozai: New Determination of Zonal Harmonics Coefficients of the Earth's Gravitational Potential (SAO Special Rep. 165, 38 1964)
- [2] F. Barlier, J. P. Chassaing, P. Muller: Surveillance de l'activité solaire á partir des observations optiques de satellites (Space Research VII. 1227, 1967)
- [3] M. III: Bahnbestimmung von künstlichen Erdsatelliten auf Grund visueller Beobachtungen (Baja Csillagvizsgáló Közl. 1, 1962)
- [4] I. D. Zsongolovics: Metodi predvarityelnoi obrabotki nabljugyenyij proizvodzaszja po programme INTEROBS (Nabljugyenyija ISZ 4, 77 1965)
- [5] E. Illés-Almár, I. Almár: Period Changes of the Satellite 1960 epsilon 3 in 1963/64 as Deduced from Observations within the INTEROBS Program (MTA Csillagvizsgáló Int. Közl. 59, 1965)
- [6] I. Almár, A Horváth, E. Illés: Analysis of the Atmospheric Drag of the Echo-1 Satellite Using the PERLO Orbital Period Determination Program (COSPAR Dynamics of Satellites Symposium Prága, 1969)
- [7] G. G. King-Hele, D. M. C. Walker: Air Density at a Height of 470 km Between Jan. 1967 and May 1968 From the Orbit of the Satellite 1966-118A (Planet. Space Sci. 17, 197, 1969)
- [8] G. E. Cook: Semi-annual Variation in Density at a Height of 90 km (Nature 222, 969, 1969)
- [9] M. III, F. Barlier, P. Kohler: A Remark on the Semi-Annual Variation of Air Density (COSPAR Dynamics of Satellites Symposium Prága, 1969)
- [10] L. G. Jacchia: Static Diffusion Models of the Upper Atmosphere With Empirical Temperature Profiles (Smithonians Contrib. to Astrophysics 8,9 1965)

*Általános összefoglaló tanulmányok*

*D. G. King-Hele:* The Upper Atmosphere and its Influence on Satellite Orbits

*L. G. Jacchia:* Recent Advances in Upper Atmosphere Structure

*M. Ja. Marov, A. M. Alpherov:* Density and Temperature Variations in the Atmosphere at Altitudes of 200-600 km

(Előadások a COSPAR XII. kongresszusán, Prága, 1969)

ezenkívül Habljugenyija iszkusztvennih szputnyikov Zemlu No 1-8 tanulmánykötetek.